

## Ferrugem-asiática da soja: bases para o manejo da doença e estratégias antirresistência



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Soja  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento***

## **DOCUMENTOS 428**

# **Ferrugem-asiática da soja: bases para o manejo da doença e estratégias antirresistência**

*Cláudia Vieira Godoy  
Claudine Dinali Santos Seixas  
Maurício Conrado Meyer  
Rafael Moreira Soares*

***Embrapa Soja  
Londrina, PR  
2020***

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Soja**  
Rod. Carlos João Strass, s/n  
Acesso Orlando Amaral, Distrito da Warta  
CEP 86001-970 ,  
Caixa Postal 231  
Londrina, PR  
Fone: (43) 3371 6000  
www.embrapa.br/soja  
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

**Comitê Local de Publicações  
da Embrapa Soja**

Presidente  
*Ricardo Vilela Abdelnoor*

Secretária-Executiva  
*Regina Maria Villas-Bôas de Campos Leite*

Membros  
*Clara Beatriz Hoffmann-Campo, Claudine Dinali Santos Seixas, Ivani de Oliveira Negrão Lopes, Liliane Márcia Mertz-Henning, Mariangela Hungria da Cunha, Mônica Juliani Zavaglia Pereira, Norman Neumaier e Vera de Toledo Benassi.*

Supervisão editorial  
*Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol*

Normalização bibliográfica  
*Valéria de Fátima Cardoso*

Projeto gráfico da coleção  
*Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Editoração eletrônica  
*Vanessa Fuzinatto Dall'Agnol*

Fotos da capa  
*Rafael Moreira Soares e  
Maurício Conrado Meyer*

**1ª edição**  
PDF digitalizado (2020).

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,  
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
Embrapa Soja

---

Ferrugem-asiática da soja: bases para o manejo da doença e  
estratégias antirresistência / Cláudia Vieira Godoy... [et al.]. –  
Londrina : Embrapa Soja, 2020.  
39 p. - (Documentos / Embrapa Soja, ISSN 2176-2937 ; n. 428).

1. Soja. 2. Ferrugem. 3. Controle integrado. I. Godoy, Cláudia Vieira. II. Seixas, Claudine Dinali Santos. III. Meyer, Maurício Conrado. IV. Soares, Rafael Moreira. V. Série.

CDD: 633.349 (21. ed.)

---

© Embrapa, 2020

## **Autores**

### **Cláudia Vieira Godoy**

Engenheira-agrônoma, doutora em Fitopatologia, pesquisadora da Embrapa Soja, Londrina, PR

### **Claudine Dinali Santos Seixas**

Engenheira-agrônoma, doutora em Fitopatologia, pesquisadora da Embrapa Soja, Londrina, PR

### **Maurício Conrado Meyer**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Proteção de Plantas, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

### **Rafael Moreira Soares**

Engenheiro-agrônomo, doutor em Proteção de Plantas, pesquisador da Embrapa Soja, Londrina, PR

## Apresentação

A ferrugem-asiática da soja é, indubitavelmente, o maior desafio fitossanitário à cultura em toda a sua história no Brasil.

Desde a sua identificação no País em 2001, um extenso banco de dados foi gerado pela pesquisa acerca do fungo *Phakopsora pachyrhizi* e de sua relação parasitária com a soja, na busca por medidas de controle. E não tem sido nada fácil combater esse poderoso inimigo, cujo tamanho do genoma se assemelha ao da planta da soja, apresentando uma extraordinária capacidade de adaptação às adversidades e sobreposição às ferramentas de manejo da doença.

Alguns erros e muito acertos foram conquistados ao longo do tempo no combate à ferrugem-asiática. O sucesso do manejo é atribuído à pesquisa e à união de esforços dos produtores, indústria e agentes governamentais de defesa fitossanitária, na implementação das medidas necessárias de combate e na constante atenção à necessidade de mudanças impostas pela adaptação do patógeno.

A Embrapa Soja tem prestado um importante serviço nesse contexto, participando ativamente na realização de pesquisa e no auxílio à definição e implementação das estratégias de controle da ferrugem-asiática.

É com grande satisfação que apresentamos esta publicação, que traz um rico compilado dos vários aspectos biológicos de *P. pachyrhizi* e discute as bases para o manejo da doença no Brasil. A Embrapa Soja espera, assim, continuar contribuindo para o avanço do conhecimento e geração de tecnologias nessa área, visando sempre promover maior sustentabilidade para toda a cadeia de produção.

Boa leitura.

*Ricardo Vilela Abdelnoor*

Chefe-Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento  
Embrapa Soja

*José Renato Bouças Farias*

Chefe-Geral  
Embrapa Soja



# Sumário

<b>Introdução .....</b>	<b>9</b>
<b>Condições de Desenvolvimento .....</b>	<b>10</b>
<b>Estratégias de Manejo.....</b>	<b>10</b>
Vazio sanitário e período de semeadura .....	11
Escape .....	15
Resistência genética .....	19
Controle químico .....	20
Fungicidas para o controle .....	21
<b>Resistência a fungicidas.....</b>	<b>26</b>
IDM – triazóis .....	28
IQe – estrobilurinas .....	29
ISDH – carboxamidas .....	31
Atual situação do controle químico da ferrugem-asiática.....	32
Fungicidas multissítios como estratégia antirresistência .....	33
<b>Referências .....</b>	<b>35</b>





## Introdução

Ferrugem é o nome das doenças causadas por fungos basidiomicetos e têm sido reconhecidas desde a antiguidade. Fungos causadores de ferrugem atuam como parasitas biotróficos, ou seja, necessitam de células vivas do hospedeiro para sobreviver e se reproduzir. Além disso, normalmente, apresentam alta especialização em relação ao hospedeiro (Deacon, 1997; Roelfs, 2001; Bedendo, 2018). O fungo que causa a ferrugem-asiática da soja, *Phakopsora pachyrhizi*, no entanto difere quanto à relação patógeno-hospedeiro que não é específica. Foram identificadas mais de 150 espécies de plantas hospedeiras de *P. pachyrhizi*, todas pertencentes à família Fabaceae, sendo algumas naturalmente infectadas e outras inoculadas em condições controladas (Ono et al., 1992; Slaminko et al., 2008).

No Brasil a doença foi identificada pela primeira vez no Paraná em 2001 (Jaccoud Filho et al., 2001; Yorinori et al., 2001). Duas safras depois, já estava presente na maioria das regiões produtoras de soja do País (Yorinori et al., 2005). Isso ocorreu pela facilidade com que esse fungo é disseminado pelo vento e pela presença da soja na maior parte do ano, considerando todas as regiões produtoras do Brasil (Hartman et al., 2015; Godoy et al., 2016).

Os sintomas da ferrugem-asiática ocorrem principalmente nas folhas e se iniciam pelo terço inferior da planta, aparecem como minúsculas pontuações mais escuras que o tecido sadio, com coloração esverdeada a cinza-esverdeada. Com o passar do tempo, as folhas infectadas pelo fungo tornam-se amarelas, ficam secas e caem. O principal dano ocasionado pela ferrugem-asiática é a desfolha precoce, que impede a completa formação dos grãos, com consequente redução da produtividade (Godoy et al., 2016).

Os sintomas podem ocorrer em qualquer estágio de desenvolvimento da planta, no entanto, a maior incidência ocorre a partir do fechamento do dossel da lavoura em razão da formação de um microclima mais favorável à infecção, promovido pela maior umidade e pelo sombreamento que protege os esporos da radiação UV e da radiação solar direta, os quais possuem efeito deletério sobre sua sobrevivência (Isard et al., 2006). A doença pode ocorrer antes do fechamento do dossel da lavoura, quando há grande quantidade de inóculo no momento da semeadura, principalmente quando há sucessão de

semeadura de soja ou semeadura próxima a áreas que estão em fase mais adiantada de desenvolvimento.

## Condições de Desenvolvimento

A penetração do fungo *P. pachyrhizi* ocorre de forma direta na folha através da epiderme. O processo de infecção depende da disponibilidade de água livre na superfície da folha, sendo necessário no mínimo seis horas de molhamento, para que ocorram infecções, com temperatura na faixa ótima (entre 15 °C e 25 °C) e mais de oito horas, para valores extremos, como 10 °C ou 27 °C (Melching et al., 1989). A precipitação favorece o desenvolvimento das epidemias (Del Ponte et al., 2006). Embora se tenha evidência de efeito negativo de altas temperaturas (acima de 27 °C) em experimentos em condições controladas (Melching et al., 1989), epidemias severas são relatadas no Brasil em locais onde temperaturas médias nessa magnitude ocorrem na safra, porém associadas com regime de precipitação bem distribuída (Yorinori et al., 2005; Del Ponte et al., 2006).

O período latente, que é o tempo entre o início da infecção e a esporulação, é também afetado pela temperatura, sendo de seis dias à temperatura de 26 °C. Esse período tende a aumentar conforme a temperatura se distancia desse ponto ótimo, em ambas as direções, podendo chegar a 12 ou 16 dias sob temperatura de 15 °C (Alves et al., 2006). Temperaturas acima da faixa favorável à infecção também afetam negativamente a germinação dos esporos e, por consequência, a taxa de desenvolvimento da doença (Kochman, 1979).

## Estratégias de Manejo

O manejo da ferrugem-asiática envolve a integração de medidas culturais, da resistência genética e a utilização de fungicidas quando a doença incide na lavoura. As opções de cultivares resistentes ainda são poucas e limitadas a poucos genes maiores de resistência. Os fungicidas sítio-específicos vêm perdendo sua eficiência em decorrência da resistência do fungo. A integração das medidas de manejo é essencial para evitar a redução de produtividade, mas a variabilidade do fungo vem ameaçando a estabilidade de produção da cultura. As estratégias foram estabelecidas levando-se em

conta as características já conhecidas dos fungos causadores de ferrugens, as constatações a campo da forma de condução dos sistemas de produção versus o comportamento de *P. pachyrhizi* e os resultados de pesquisas de diversas instituições do Brasil e do exterior sobre o patossistema.

## Vazio sanitário e período de semeadura

As áreas de produção de soja no mundo onde a ferrugem pode ocorrer podem ser divididas em áreas onde o fungo sobrevive durante todo o ano, se um hospedeiro adequado estiver presente e áreas onde as epidemias de ferrugem sazonais dependem de dispersão de longa distância do inóculo a partir de uma área de origem (Li et al., 2010). As condições ambientais em grande parte do Brasil, do Paraguai e da Bolívia são propícias para a sobrevivência do patógeno durante todo o ano, enquanto a ocorrência de epidemias de ferrugem na Argentina e no cinturão de soja dos EUA depende de dispersão de esporos produzidos em áreas distantes dessas regiões (Pivonia; Yang, 2004; Li et al., 2010).

Nos primeiros anos após a introdução do fungo *P. pachyrhizi* no Brasil, epidemias severas foram relatadas próximo a áreas com semeadura de soja irrigada durante a entressafra (junho a setembro). Essas áreas semeadas no inverno mantinham o inóculo para a próxima safra, funcionando como uma ponte verde para o fungo. A incidência precoce da ferrugem, ainda no período vegetativo, era observada em lavouras semeadas próximo a áreas semeadas na entressafra. Na safra 2003/2004, no Mato Grosso (Sorriso, Campo Novo do Parecis, Campos de Júlio, Sapezal e Primavera do Leste) e em Goiás (Goiânia), a incidência da ferrugem foi relatada 25 a 30 dias após a germinação, atingindo níveis epidêmicos no mês de dezembro (Seixas; Godoy, 2007). Na região de Primavera do Leste, o número de aplicações de fungicidas foi de 4,5 a 5,0 e houve casos de abandono de lavoura (Siqueri, 2005).

Com o objetivo de reduzir o inóculo durante a entressafra, em 2005, no Mato Grosso, a Superintendência Federal de Agricultura no Estado e o Instituto de Defesa Agropecuária assinaram uma recomendação conjunta para que se mantivessem as áreas irrigadas sob pivô central sem cultivo de soja e sem a presença de plantas voluntárias durante o inverno até o início da semeadura da safra de verão. Porém, naquele ano, foi liberada a

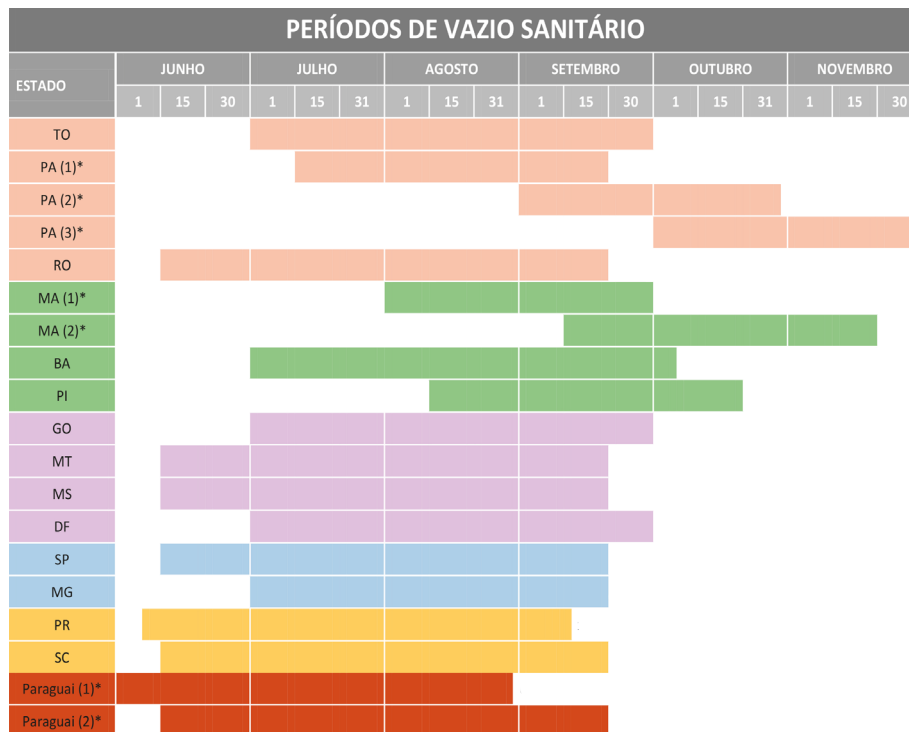
soja *Roundup Ready*® no Brasil e muitos produtores utilizaram as áreas com irrigação para a multiplicação de sementes. Em 2006, órgãos de defesa dos Estados de Goiás, de Tocantins e de Mato Grosso instituíram o vazio sanitário por meio de Instrução Normativa ou Portaria. O vazio sanitário é um período mínimo de 60 dias sem a presença de plantas de soja no campo, durante a entressafra. Esse período foi definido com base na maior sobrevivência de esporos relatada, que foi de 55 dias em folhas de soja infectadas e armazenadas à sombra (Patil et al., 1997). Não houve pesquisa específica para a implantação do vazio sanitário. O suporte para a implantação dessa medida foi o fato do fungo ser biotrófico, da constatação da ponte verde e de informações da literatura nacional e internacional. O objetivo do vazio sanitário é a redução de inóculo do fungo durante a entressafra, por meio da eliminação do principal hospedeiro, a soja.

Em janeiro de 2007, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) publicou a IN nº 2 que instituiu o Programa Nacional de Controle da Ferrugem-Asiática da Soja. De acordo com esse programa, comitês formados em todos os estados deveriam avaliar a necessidade de adotar o período livre de soja de no mínimo 60 dias na entressafra.

O resultado esperado com o vazio sanitário é o atraso nas primeiras ocorrências de ferrugem-asiática na safra, diminuindo a possibilidade de ocorrência da doença nos estádios iniciais do desenvolvimento da soja nas primeiras semeaduras e, conseqüentemente, podendo reduzir o número de aplicações de fungicidas necessárias para o controle.

Mesmo com períodos de 60 a 99 dias sem soja no campo (vazio sanitário), estabelecidos nas instruções normativas/portarias/leis de 13 estados e do Distrito Federal (Figura 1), o Brasil ainda possui um extenso período de semeadura de soja. Nas principais regiões produtoras, em razão do clima favorável e em alguns casos por causa do uso de irrigação, é possível semear soja desde o início de setembro até o final de fevereiro (Figura 2), sendo possível assim realizar duas semeaduras consecutivas de soja na mesma área ou mesmo semear soja após outra cultura nos meses de janeiro e fevereiro, caracterizando o que se denomina de “semeadura de segunda época” ou “safrinha”. No entanto, essas áreas semeadas tardiamente recebem inóculo

das áreas semeadas no início da safra, podendo ocorrer incidência precoce da ferrugem e aumentar o número de ciclos do fungo em uma mesma safra, aumentando o número de pulverizações durante o ano agrícola.



PA (1): Microrregiões de Conceição do Araguaia, Redenção, Marabá, São Feliz do Xingu, Parauapebas, Itaituba (com exc. municípios de Rurópolis e Trairão) , e Altamira (Distritos de Castelo dos Sonhos e Cachoeira da Serra). PA (2): Microrregiões de Paragominas, Bragantina, Guamá, Tomé-Açu, Salgado, Tucuruí, Castanhal, Arari, Belém, Cametá, Furos de Breves e de Portel. PA (3): Microrregiões de Santarém, Almeirim, Óbidos, Itaituba (municípios de Rurópolis e Trairão) e de Altamira (com exc. Distritos de Castelo dos Sonhos e Cachoeira da Serra).

MA (1): Microrregiões de Alto Mearim e Grajaú; Chapadas do Alto Itapecuru, Chapadas das Mangabeiras; Gerais de Balsas, Imperatriz; Porto Franco. MA (2): Microrregiões de Aglomeração Urbana de São Luís; Baixada Maranhense; Baixo Parnaíba Maranhense; Caxias; Chapadinha; Codó; Coelho Neto; Gurupi; Itapecuru Mirim; Lençóis Maranhenses; Litoral Ocidental Maranhense; Médio Mearim; Pindaré; Presidente Dutra; Rosário.

Paraguai (1): Región Oriental de 01/06 a 30/08 (Res. N. 071/11). Paraguai (2): Región Occidental de 15/06 a 15/09 (Res. N. 633/17)

**Figura 1.** Períodos de vazio sanitário em estados brasileiros e no Paraguai, estabelecidos por normativas em seus respectivos órgãos de defesa fitossanitária.

PERÍODOS DE SEMEADURA DE SOJA																		
ESTADO	SETEMBRO			OUTUBRO			NOVEMBRO			DEZEMBRO			JANEIRO			FEVEREIRO		
	1	15	30	1	15	31	1	15	30	1	15	31	1	15	31	1	15	28
TO							01/10 a 15/01											
BA							08/10 a 15/01									COLHEITA 30/05		
MT							16/09 a 31/12						COLHEITA 05/05					
MS							16/09 a 31/12											
GO							01/10 a 31/12											
SC							15/09 a 10/02											

As cores indicam as regiões

TO, BA, MT e MS: proibido soja sobre soja

**Figura 2.** Períodos de semeadura de soja estabelecidos por normativas em seis estados brasileiros e data limite de colheita nos estados que incluíram essa restrição na normativa.

A perda de eficiência de fungicidas em razão do elevado número de aplicações foi evidente nos últimos anos, com uma série de mutações se acumulando no genoma do fungo (Schmitz et al., 2014; Klosowski et al., 2016a; Simões et al., 2018). Reis et al. (2017), diante da situação de redução do controle da ferrugem-asiática conferida pelos fungicidas, sugeriram a implementação de diversas medidas, entre elas impedir o cultivo da soja safrinha. Essa medida visa reduzir a janela de semeadura e evitar que populações do fungo que já vinham sendo pressionadas para resistência, continuem a receber ainda mais aplicações de fungicidas, acelerando a seleção de populações resistentes. Assim, apesar das condições climáticas serem menos favoráveis ao desenvolvimento da ferrugem-asiática nas semeaduras mais tardias (fevereiro), em razão do menor período de precipitação, o alongamento do cultivo (ponte verde) e o aparecimento da doença nessas semeaduras, demandando aplicações de fungicida, reforça o argumento de se evitar a semeadura nessa época, para reduzir a pressão de seleção de resistência do fungo aos poucos fungicidas que ainda apresentam eficiência de controle da doença.

Com o objetivo de reduzir a pressão de seleção para resistência aos fungicidas, a partir de 2014, quando ocorreu a resistência ao grupo dos inibidores de quinona externa (IQe), os estados de Goiás e de Mato Grosso definiram

datas limites de semeadura até 31 de dezembro, numa tentativa de reduzir o número de aplicações ao longo da safra, para tentar reduzir a pressão de seleção sobre o último grupo de fungicidas para o qual ainda não havia sido relatada resistência, os inibidores da enzima succinato desidrogenase (ISDH). A sugestão dessa política pública surgiu após apresentação dos resultados dos ensaios cooperativos da safra 2013/2014 (Godoy et al., 2014), com a participação de diversas instituições de pesquisa e de ensino, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa), empresas fabricantes de agrotóxicos e o Comitê de Ação a Resistência a Fungicidas (FRAC-Brasil). A determinação de data limite para semeadura de soja nos estados foi uma das propostas apresentadas em moção publicada pelo Consórcio Antiferrugem em 2014 (Consórcio Antiferrugem, 2014). Tal medida foi implementada por seis estados produtores de soja ao longo dos anos (Figura 2). Alguns estados incluíram, nas normativas, data limite para colheita (BA e MT) e proibição explícita de semeadura de soja sobre soja, ou seja, em área onde havia cultivo de soja logo antes (TO, BA, MT e MS).

O objetivo das datas limites de semeadura é reduzir o número de aplicações de fungicidas ao longo da safra, reduzindo a pressão de seleção para resistência aos fungicidas.

Para mais informações sobre as normativas vigentes para cada estado, consultas podem ser feitas às Secretarias da Agricultura ou aos órgãos de defesa fitossanitária estaduais.

## Escape

Medidas de controle baseadas no escape, também conhecido como evasão, visam a prevenção da doença pela fuga em relação à presença do patógeno e/ou às condições ambientes mais favoráveis ao seu desenvolvimento.

Para o controle da ferrugem-asiática, o escape é realizado semeando cultivares de soja precoces no início da época recomendada. Nos últimos 10 anos, houve uma mudança no desenvolvimento de cultivares com grande demanda por cultivares de soja precoce, visando principalmente viabilizar uma segunda safra com a cultura do milho principalmente e também algodão em algumas regiões. Essa mudança beneficiou o controle da ferrugem-asiática.

As primeiras semeaduras realizadas após o vazio sanitário tendem a apresentar sintomas da doença a partir da fase de enchimento de grãos, quando apresentam. À medida que as semeaduras avançam, esporos do fungo das primeiras áreas semeadas se disseminam para as áreas tardias, antecipando a ocorrência da doença e necessitando de maior número de pulverizações para o controle da ferrugem-asiática.

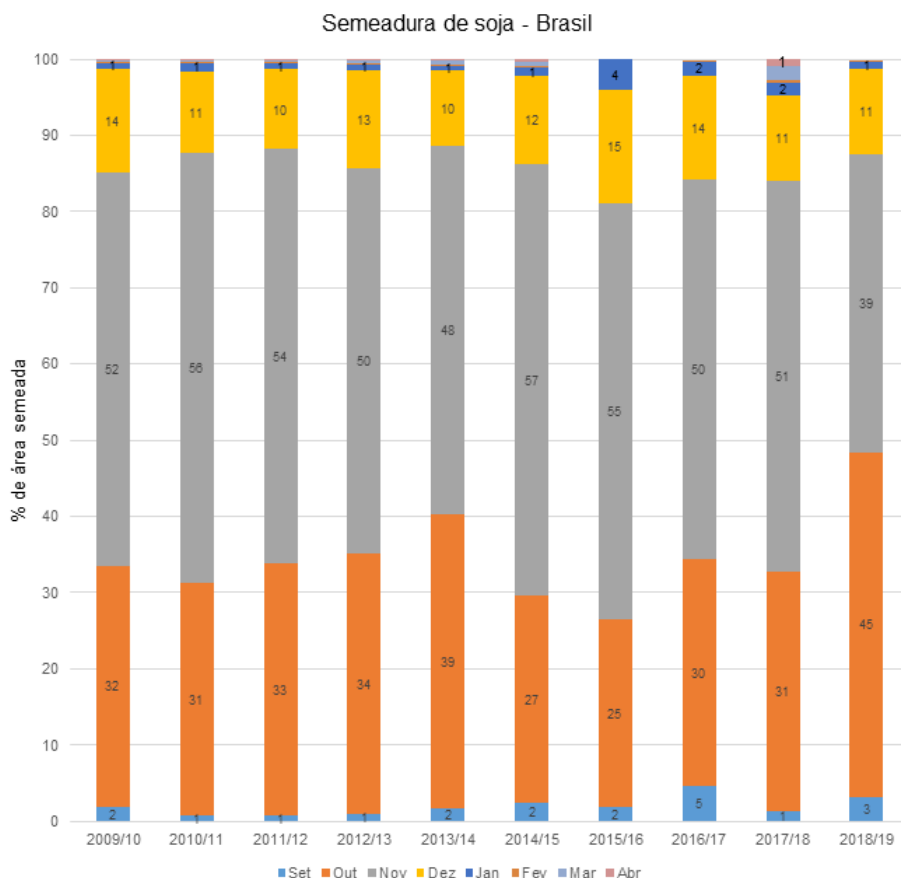
A semeadura de soja no Brasil se concentra nos meses de outubro e novembro, com média de 84% das áreas semeadas nesses meses nos últimos 10 anos (Figura 3). Uma pequena porcentagem das áreas é semeada em setembro (2% em média), só sendo possível nos estados que finalizam o período do vazio sanitário em setembro (PR, MG, SP, MS, MT, RO e parte do PA), quando há condições de umidade no solo ou sob irrigação. As semeaduras a partir de dezembro no Brasil representam 14% em média (Figura 3). Essa porcentagem de área semeada a partir de dezembro, não é uniforme entre as regiões, sendo a média semeada nas últimas 10 safras de 51% na região Norte (RR, RO, PA e TO), 47% na região Nordeste (MA, PI e BA), 6,6% na região Centro-Oeste (MT, MS, GO e DF), 9,1% na região Sudeste (MG e SP) e 12,7% na região Sul (PR, SC e RS), de acordo com banco de dados da CONAB<sup>1</sup>.

Dentro de uma mesma região, também há desuniformidade na porcentagem de área semeada em dezembro em razão do final do período de vazio sanitário e início das condições favoráveis. Por exemplo, no Centro-Oeste, enquanto no Mato Grosso a média da área semeada em dezembro foi de 6,6% nos últimos 10 anos, em Goiás foi de 9,4%, de acordo com o banco de dados da CONAB. Apesar de serem estados limítrofes, o final dos períodos de vazio sanitário é diferente. No estado de Mato Grosso o vazio sanitário finaliza em 15 de setembro enquanto em Goiás, as semeaduras se iniciam em outubro explicando a maior porcentagem de áreas semeadas em dezembro. Na região Sul, enquanto o estado do Paraná apresentou em média 3,4% de áreas semeadas em dezembro nos últimos 10 anos, o Rio Grande do Sul apresentou 20,5% em razão das características climáticas do estado, de acordo com o banco de dados da CONAB.

---

<sup>1</sup> Banco de dados enviado por e-mail, de Cleverton Tiago Carneiro de Santana, Superintendente de Informações do Agronegócio/ Diretoria de Política Agrícola e Informações da CONAB, recebido pela pesquisadora Cláudia Vieira Godoy, em 27 de março de 2020.





**Figura 3.** Evolução da porcentagem de área semeada no Brasil, nas últimas 10 safras agrícolas.

Fonte: banco de dados da CONAB.

Essa diversidade de situações no Brasil ilustra a dificuldade no manejo da ferrugem-asiática, uma vez que o fungo inicia sua multiplicação nas primeiras semeaduras e se dissemina pelo vento para áreas e regiões vizinhas. As regiões e, mesmo os municípios dentro de uma mesma região, com semeaduras mais tardias, tendem a receber inóculo do fungo das primeiras semeaduras e podem necessitar de fungicidas com boa eficiência de controle da doença.

As primeiras ocorrências de ferrugem em lavouras comerciais têm sido relatadas no site do Consórcio Antiferrugem nos últimos anos nos meses de

novembro, dezembro e em alguns estados somente em janeiro (Tabela 1), evidenciando o escape da doença. Nessa situação, muitas lavouras já se encontram na fase de formação de grãos ou até em colheita. Para os estados que iniciam a semeadura em 10 de setembro, quando há condições hídricas, cultivares com 100 dias de ciclo acabam não tendo incidência de ferrugem-asiática. O potencial de dano da ferrugem reduz à medida que a doença incide mais tarde na lavoura. No entanto, nem todas as regiões conseguem semear cedo (Figura 3) em decorrência das limitações climáticas. Em função da sua agressividade, mesmo com incidência tardia, a ferrugem ainda é capaz de reduzir a produtividade da soja, mas o seu controle é mais fácil comparado com situações de incidência no início do florescimento ou mesmo no período vegetativo. Havendo condições climáticas favoráveis ao desenvolvimento da doença, quanto mais tarde a semeadura, maior quantidade de inóculo a lavoura vai receber proveniente das primeiras áreas semeadas, com início mais precoce da doença e maior necessidade de aplicações de fungicidas. A inclusão da prática de semear no início da época recomendada foi incluída nas estratégias de controle da doença exatamente por esse motivo.

**Tabela 1.** Primeiros relatos de ocorrência de ferrugem-asiática por estado nas últimas cinco safras.

Estado	2015/2016	2016/2017	2017/2018	2018/2019	2019/2020*
RS	03/12/15	20/12/16	16/11/17	27/11/18	11/12/19
SC	18/11/15	07/01/17	18/12/17	13/11/18	10/12/19
PR	27/11/15	16/11/16	23/11/17	31/10/18	03/12/19
SP	05/11/15	11/11/16	20/11/17	07/11/18	10/12/19
MG	15/12/15	03/01/17	30/11/17	23/11/18	27/12/19
MS	01/12/15	03/11/16	02/01/18	19/11/18	19/12/19
GO	05/01/16	10/01/17	27/12/17	17/12/18	14/01/20
MT	04/01/16	03/12/16	22/12/17	13/12/18	02/01/20
BA	25/01/16	18/01/17	03/01/18	20/02/19	10/02/20
PI	-	14/02/17	-	22/02/19	10/04/20
MA	05/02/16	05/02/17	16/02/18	10/01/19	-
TO	27/01/16	05/02/17	18/01/18	04/01/19	06/03/20
RO	02/02/16	16/01/17	28/12/17	29/11/18	10/01/20
PA	01/04/16	-	13/04/18	15/02/19	29/04/20
DF	-	-	-	-	06/02/20

\*Dados registrados até 01/05/2020.

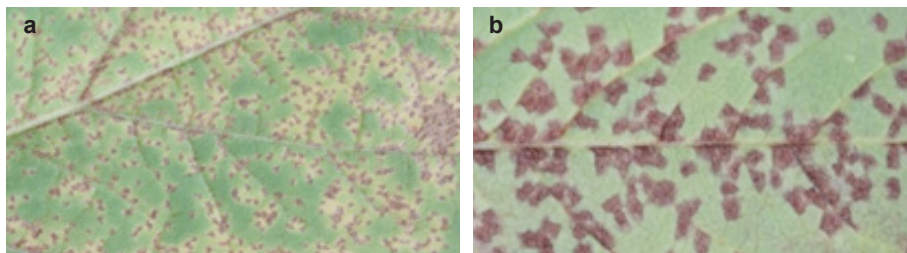
Fonte: Consórcio Antiferrugem (2020a).

## Resistência genética

O uso de cultivares com gene(s) de resistência à ferrugem-asiática da soja é uma ferramenta importante para o manejo da doença, pois, além de serem menos sujeitas a perdas de produtividade, ajudam a reduzir a pressão de seleção para resistência do fungo aos fungicidas. A diferença entre as cultivares suscetíveis e as resistentes está no tipo de lesão que o fungo causa nas plantas (Bromfield; Hartwig, 1980). Cultivares suscetíveis apresentam lesões *TAN* (Figura 4a), termo em inglês que significa marrom-claro e produz grande quantidade de uredosporos, o que leva a um rápido aumento do número de lesões nas folhas, causando amarelecimento e desfolha prematura das plantas.

Cultivares resistentes apresentam lesões *RB* (*Reddish brown*), que têm coloração marrom-avermelhada (Figura 4b), são maiores que as lesões *TAN*, produzem pouco ou nenhum uredosporo dependendo do gene e, por terem seu desenvolvimento limitado pela reação de resistência da planta, não causam amarelecimento e queda de folhas de forma tão intensa quando comparadas às lesões *TAN* em cultivares suscetíveis (Bromfield; Hartwig, 1980).

Fotos: Cláudia Vieira Godoy



**Figura 4.** Lesão do tipo *TAN* (castanha) (a) e *RB* (*Reddish Brown*: marrom-avermelhada) (b).

As cultivares resistentes não são imunes à ferrugem-asiática, pois o fungo ainda consegue causar lesões nas plantas. Por isso, o uso dessas cultivares não dispensa a adoção das outras medidas de manejo para a doença, incluindo a pulverização com fungicidas. O uso de cultivares resistentes como estratégia única de manejo tem as mesmas limitações que o uso de fungicidas, porque pode haver seleção para populações capazes de “quebrar” a resistência dessas cultivares.

Dez genes de resistência a *P. pachyrhizi* (Rpp) ou alelos já foram mapeados em sete loci, nomeados *Rpp1* a *Rpp7* (Childs et al., 2018). Porém, como são genes de efeito dominante, apresentam a mesma limitação dos fungicidas sítio-específicos, podendo ser vencidos pela variabilidade do fungo. Um número limitado de cultivares com genes de resistência encontra-se disponível para o produtor, por diferentes programas de melhoramento (ex.: BRS 511, BRS 7280RR, BRS 531, TMG 7061 IPRO, TMG 7062IPRO, TMG 7063IPRO, TMG 7067IPRO, TMG 7260 IPRO, TMG 7262 RR, TMG 7363 RR, entre outras cultivares). Essas cultivares têm sido utilizadas em regiões e épocas de maior ocorrência do fungo *P. pachyrhizi*. Apesar de não ser difícil incorporar resistência a *P. pachyrhizi* utilizando genes maiores, muitos programas de melhoramento têm optado por não incorporar resistência e apenas selecionar cultivares precoces, uma vez que a incidência da doença tem sido baixa na safra principal em razão do vazio sanitário e do escape.

A seleção/adaptação de patógenos a cultivares é reportada em inúmeras espécies de plantas cultivadas e inúmeros patógenos. Segundo Matiello et al. (1997) a dinâmica de uma população de patógenos numa área de produção é muito intensa. Com isso, a possibilidade desses indivíduos vencerem barreiras como a resistência conferida por genes e outros mecanismos de controle, como fungicidas, por exemplo, é inevitavelmente viável. Em soja, inúmeros exemplos de “quebra” de resistência já foram relatados, entre eles o do nematoide de cisto da soja (NCS). Estudos com cultivares de soja em Illinois, EUA, resistentes a raças de NCS presentes no estado mostraram que após vários anos de cultivo dessas cultivares, 70% das populações de NCS haviam se adaptado reduzindo significativamente a eficiência do controle genético (Niblack et al., 2008). Fato similar ocorreu em Mato Grosso, onde Dias et al. (1998) relataram a “quebra” de resistência ao NCS na cultivar Hartwig.

## Controle químico

O controle químico é uma das estratégias de controle da ferrugem-asiática. As aplicações de fungicidas são recomendadas no início do aparecimento dos sintomas ou preventivamente. O controle preventivo deve levar em conta

os fatores necessários ao aparecimento da ferrugem-asiática (presença do fungo na região, idade da planta e condição climática favorável), a logística de aplicação (disponibilidade de equipamentos e tamanho da propriedade), a presença de outras doenças e o custo do controle.

### Fungicidas para o controle

Baseado no espectro de ação, os fungicidas podem ser classificados em sítio-específicos ou multissítios (McGrath, 2004).

Fungicidas sítio-específicos são ativos contra um único ponto da via metabólica de um patógeno ou contra uma única enzima ou proteína necessária para a sobrevivência do fungo. Uma vez que esses fungicidas são específicos em sua toxicidade, eles podem ser absorvidos pelas plantas e tendem a ter propriedades sistêmicas (McGrath, 2004). Dentre os principais modos de ação sítio-específicos utilizados no controle da ferrugem-asiática destacam-se os inibidores da desmetilação (IDM, “triazóis”), os inibidores de quinona externa (IQe, “estrobilurinas”) e os inibidores da enzima succinato desidrogenase (ISDH, “carboxamidas”).

Fungicidas multissítios afetam diferentes pontos metabólicos do fungo e apresentam baixo risco de resistência. Esse tipo de fungicida forma uma camada protetora na superfície da folha, não é absorvido pela planta, sendo mais facilmente lavado com chuvas (McGrath, 2004).

No Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários - Agrofit, disponível no site do Mapa, são encontrados 70 fungicidas comerciais registrados para controle do fungo *P. pachyrhizi*, em consulta realizada no dia 28 de fevereiro de 2020 (Agrofit, c2003). Entre os fungicidas comerciais, encontram-se registrados fungicidas clones (mesmo fungicida com nome comercial diferente) e fungicidas genéricos (produtos com o mesmo princípio ativo). Apesar do número elevado de fungicidas comerciais registrados, a maioria é formada pela combinação de ingredientes ativos dos três modos de ação sítios-específicos mencionados, alguns em combinação com multissítios e há 30 registros de fungicidas multissítios isolados (clorotalonil, mancozebe e oxicloreto de cobre, principalmente) (Tabela 2).

**Tabela 2.** Grupos de fungicidas e ingredientes ativos que compõem os produtos comerciais registrados no Agrofit para o controle do fungo *Phakopsora pachyrhizi*.

Grupo	Ingrediente ativo
Estrobilurinas (IQe)	azoxistrobina, trifloxistrobina, picoxistrobina, piraclostrobina, metominostrobin e cresoxim-metílico
Triazóis e triazolinona (IDM)	epoxiconazol, tebuconazol, ciproconazol, difenoconazol e prothioconazol
Morfolina	fenpropimorfe
Carboxamidas (ISDH)	fluxapiroxade, benzovindiflupir e fluxapiroxade
Fenilpiridinilamina	fluazinam
MBC	carbendazim e tiofanato metílico - sem ação sobre o fungo <i>P. pachyrhizi</i>
Fungicidas multissítios	clorotalonil, oxicloreto de cobre, mancozebe e metiran

Fonte: Agrofit (c2003).

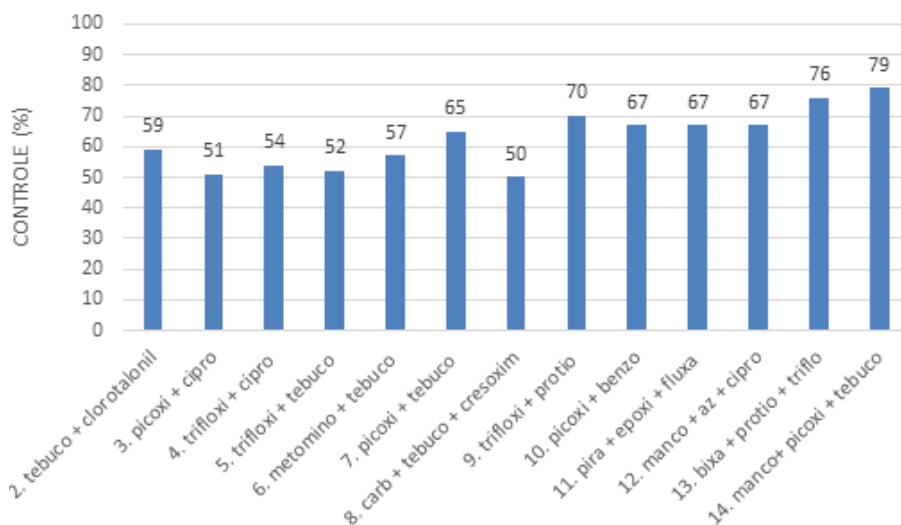
Os principais fungicidas registrados e em fase de registro são avaliados anualmente pela rede de ensaios cooperativos e os resultados de eficiência são publicados no site do Consórcio Antiferrugem (2020b). Nos experimentos cooperativos os fungicidas são avaliados individualmente, em aplicações sequenciais, para determinar a eficiência de controle. Essas informações devem ser utilizadas em programas de controle, adequando os programas à época de semeadura, doenças predominantes na região, material genético e condições climáticas da safra.

Na safra 2018/2019 foram realizados 31 experimentos por 21 instituições (Tabela 3). Os experimentos para ferrugem-asiática são realizados em semeaduras dos meses de novembro e dezembro, para evitar o escape da doença que ocorre nas semeaduras iniciais. As aplicações são iniciadas aos 45-50 dias após a emergência, no pré-fechamento das linhas de semeadura. A calendarização não é uma recomendação de controle. Ela é realizada nos experimentos em rede para reduzir as causas de variação. São realizadas três a quatro aplicações em intervalos de 15 dias, em média.

**Tabela 3.** Instituições, locais e datas de semeadura da soja dos ensaios realizados na safra 2018/2019.

Instituição		Município, Estado	Semeadura
1	Instituto Mato-Grossense do Algodão - IMAmt	Primavera do Leste, MT	06/12/2018
2	3M Experimentação Agrícola	Ponta Grossa, PR	06/12/2018
3	Embrapa Soja	Londrina, PR	12/12/2018
4	Fundação MS	Amambai, MS	24/11/2018
5	Fundação MS	Campo Grande, MS	28/11/2018
6	Fundação MS	Maracaju, MS	21/11/2018
7	Fundação MS	São Gabriel do Oeste, MS	01/11/2018
8	Fundação Chapadão	Chapadão do Sul, MS	23/11/2018
9	Dallas Pesquisa Agropecuária	Passo Fundo, RS	16/11/2018
10	Centro de Pesquisa Agrícola Copacol	Cafelândia, PR	29/10/2018
11	Agro Carregal Pesquisa e Proteção de Plantas Eireli	Rio Verde, GO	10/12/2018
12	UnirV (FESURV) / Campos Pesquisa Agrícola	Rio Verde, GO	08/12/2018
13	Fundação Rio Verde	Lucas do Rio Verde, MT	12/12/2018
14	Estação Experimental Assist Consultoria	Campo Verde, MT	14/11/2018
15	Agrodinâmica Pesquisa e Consultoria Agropecuária	Diamantino, MT	09/11/2018
16	Agrodinâmica Pesquisa e Consultoria Agropecuária	Diamantino, MT	04/12/2018
17	Agrodinâmica Pesquisa e Consultoria Agropecuária	Campo Novo do Parecis, MT	04/12/2018
18	Instituto Phytus	Itaara, RS	11/12/2018
19	Estação de Pesquisa Juliagro	Uberlândia, MG	29/11/2018
20	Instituto Phytus	Planaltina, DF	15/12/2018
21	Fundação MT	Campo Verde, MT	22/11/2018
22	Fundação MT	Pedra Preta, MT	06/12/2018
23	Fundação MT	Primavera do Leste, MT	28/11/2018
24	Fundação MT	Sapezal, MT	04/12/2018
25	CTPA/ Emater-GO	Silvânia, GO	10/11/2018
26	Santagro Pesquisa e Desenvolvimento	Erebango, RS	13/11/2018
27	CWR Pesquisa Agrícola Ltda.	Palmeira, PR	26/12/2018
28	TAGRO - Tecnologia Agropecuária Ltda.	Faxinal, PR	15/11/2018
29	Círculo Verde	Luís Eduardo Magalhães, BA	28/12/2018
30	CTPA/ Emater-GO	São Miguel do Passa Quatro, GO	20/12/2018
31	Fundação Chapadão	Chapadão do Sul, MS	10/10/2018

Na sumarização da safra 2018/2019 foram utilizados 19 experimentos. Não foram utilizados na análise os experimentos com baixa severidade de ferrugem-asiática ou os experimentos aplicados com sintomas aos 45 dias. A média de controle dos fungicidas registrados avaliados variou de 50% a 79% (Figura 5). Apesar do grande número de fungicidas registrados, somente três fungicidas comerciais apresentaram eficiência acima de 70% de controle na safra 2018/2019 (Figura 5). Entre os produtos em fase de registro, há cinco fungicidas com eficiência acima de 70% (Godoy et al., 2019a), porém são misturas dos mesmos modos de ação que já vêm sendo utilizados no campo (IDM, IQe e ISDH), sendo alguns com novos ingredientes ativos dentro desses modos de ação, como é o caso dos ISDH.



**Figura 5.** Porcentagem de controle da ferrugem-asiática em relação à testemunha sem fungicida. Média de 19 experimentos, safra 2018/2019. Fungicidas registrados.

Fonte: Godoy et al. (2019a).

A redução de produtividade para os fungicidas com eficiência ao redor de 50% foi de 18%, comparado com os tratamentos com as maiores eficiências de controle (tratamentos 13 e 14) (Godoy et al., 2019a). Fungicidas registrados com eficiência ao redor de 50% de controle para ferrugem-asiática têm sido utilizados em misturas com fungicidas multissítios (clorotalonil, mancozebe e



oxicloreto de cobre). Segundo Reis et al. (2017) fungicidas multissítios não têm potencial para recuperar o controle de fungicidas sítio-específicos que apresentem eficácia inferior a 50%.

Entre os fungicidas multissítios registrados, a eficiência observada nos experimentos em rede é muito variável em decorrência das características inerentes dos próprios produtos que são influenciados pelas condições ambientais. Fungicidas multissítios são pulverizados nas partes suscetíveis do hospedeiro com o objetivo de formar uma camada protetora e impedir o desenvolvimento de infecções fúngicas. Mesmo com a aplicação bem sucedida desses fungicidas, o controle de organismos patogênicos pode ser influenciado negativamente em razão da degradação química, física ou biológica do ingrediente ativo (Neely, 1970; Schepers, 1996). Entre todos os processos que ocorrem no ambiente, a precipitação tem o maior efeito sobre sua atividade residual (McDowell et al., 1987; Schepers, 1996). A ocorrência de chuvas pode afetar a estrutura e a atividade dos depósitos sobre a folha, por sua diluição, redistribuição, remoção e extração física a partir de tecidos de plantas (Thacker; Young, 1999). Fungicidas multissítios não apresentam residual elevado. O controle máximo médio observado para o fungicida multissítio clorotalonil nos experimentos em rede, quando aplicado em intervalos de 10 dias (cinco aplicações) foi de 63% (Figura 6). Quando aplicado em intervalo médio de 15 dias (quatro aplicações), que é o intervalo comumente utilizado no campo em mistura com os fungicidas sítio-específicos, a eficiência máxima média para o fungicida clorotalonil foi de 41% nos experimentos cooperativos (Figura 6). A dose avaliada nos experimentos em rede é a dose recomendada pelas empresas e utilizada no campo. Para mancozebe, a dose avaliada nos experimentos em rede variou entre 1125 g a 1200 g i.a./ha, correspondendo a 1,5 kg/ha de produto comercial, dependendo da concentração do produto. Em anos anteriores, o fungicida mancozebe foi avaliado nos experimentos em rede em doses de 2 kg/ha a 2,5 kg/ha, com aumento de eficiência à medida que aumentou a dose.

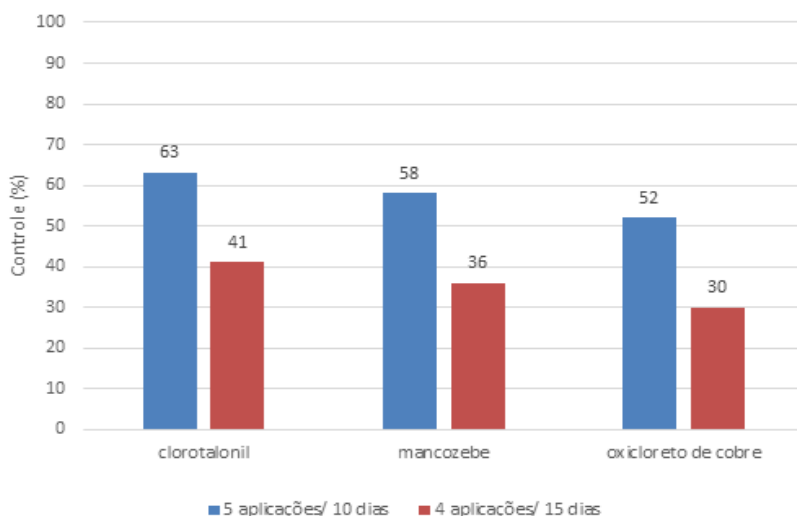


Figura 6. Porcentagem de controle da ferrugem-asiática por fungicidas multissítios em relação à testemunha sem fungicida, média das safras 2017/2018 e 2018/2019.

Fonte: Godoy et al. (2018b, 2019b).

## Resistência a fungicidas

Os fungicidas são utilizados na agricultura há mais de um século e inicialmente não havia relatos de perdas de eficácia no campo. Um abrangente texto inicial sobre fungicidas e sua ação (Horsfall, 1945) não incluía qualquer referência à resistência. Os casos de resistência confirmada a fungicidas permaneceram raros até a década de 1970, quando novas classes de produtos químicos antifúngicos com modos de ação específicos foram introduzidas e tornaram-se amplamente utilizadas (Brent, 2012). Desde então, tem havido incidência cada vez maior de casos notificados em uma ampla gama de fungos fitopatogênicos. Resistência tornou-se um fato comum para a indústria de proteção de culturas. Existe uma ampla e crescente literatura sobre resistência a fungicidas, referente a diferentes patógenos e culturas, contrastando os modos de ação e estratégias antirresistência (Thind, 2012; Lucas et al., 2015).

A resistência a fungicidas é uma resposta evolutiva natural dos fungos a uma ameaça externa para a sua sobrevivência, nesse caso o fungicida. Quando

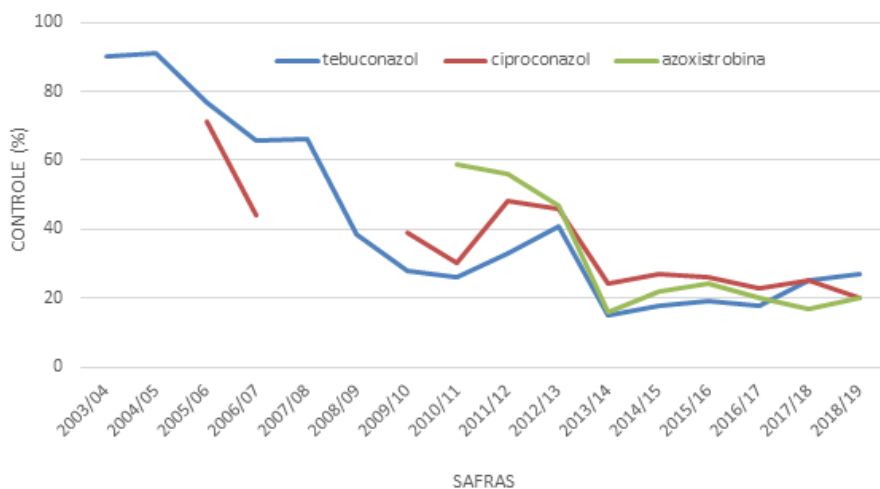
fungicidas com modo de ação específico começam a ser aplicados, tendem a eliminar populações mais sensíveis do patógeno, aumentando a frequência das populações menos sensíveis. A evolução de resistência aos fungicidas emergiu como um dos problemas mais sérios que ameaçam a segurança alimentar. Muitos patógenos foram selecionados após dois anos de uso de fungicidas sítio-específicos. A pesquisa e a experiência em resistência a fungicidas nos últimos 40 anos geraram um conjunto significativo de conhecimentos. Muito desse conhecimento é avaliado e publicado pelo Comitê de Ação a Resistência a Fungicidas (FRAC) (Brent, 2012).

O uso rotineiro de fungicidas para controlar doenças de plantas tem sido um elemento importante na intensificação da agricultura moderna e ajudou a aumentar o rendimento das culturas, melhorar a qualidade e garantir a estabilidade da produção. Nas últimas décadas, agricultores e produtores tiveram acesso a uma variedade de produtos químicos eficazes, ativos em baixas doses e com alto nível de controle da doença (Russell, 2005). Esse cenário agora está mudando. O custo e as dificuldades na descoberta e no registro de novos ativos levaram a um declínio no descobrimento de novos produtos. O surgimento de resistência a algumas das classes mais importantes de fungicidas em muitos patógenos e o ambiente regulatório cada vez mais adverso, especialmente na Europa, resultou na retirada de muitos princípios ativos do mercado, comprometendo o controle, a exemplo do multissítio clorotalonil que foi banido da Europa em 2019. Para alguns fitopatógenos existe a preocupação de que opções químicas para seu controle estejam se tornando limitadas ou até indisponíveis, situação análoga à dos antibióticos no controle de doenças humanas (Lucas et al., 2015).

Nos casos em que foram elucidados, os mecanismos de resistência geralmente envolvem alguma modificação do alvo bioquímico no patógeno, o que diminui a afinidade do fungicida por seu alvo. De forma geral, fungicidas sítio-específicos, com sítio único de ação, podem tornar-se menos eficazes por meio de uma mutação que altera uma única base de DNA no gene alvo e, conseqüentemente, apenas um aminoácido na proteína alvo (Brent, 2012).

## IDM – triazóis

O primeiro fungicida IDM a apresentar menor eficiência no controle de *P. pachyrhizi* foi o flutriafol. Nos experimentos em rede, a eficiência dos fungicidas triazóis tem diminuído ao longo do tempo (Figura 7). A partir da safra 2008/2009, iniciaram-se as recomendações para que se evitasse a utilização de fungicidas triazóis isolados nos Cerrados, utilizando somente misturas com estrobilurinas. Depois de 2007/2008, a redução de eficiência foi geral para fungicidas IDM, com exceção para o protioconazol, lançado em 2010, em mistura com trifloxistrobina. Na safra 2017/2018 a eficiência média dos IDM tebuconazol e ciproconazol nos ensaios em rede foi de 25% de controle, com média de três a quatro aplicações em intervalos de 14 dias (Figura 7). Em razão da baixa eficiência para o alvo biológico *P. pachyrhizi*, em 2017, o registro desses fungicidas foi suspenso, para o alvo, pelo Mapa.



**Figura 7.** Porcentagem de controle da ferrugem-asiática com os fungicidas tebuconazol, ciproconazol e azoxistrobina nos experimentos cooperativos entre as safras 2003/2004 e 2018/2019, em diferentes regiões produtoras no Brasil.

Fonte: adaptado de Godoy et al. (2018a).

Alta variabilidade da sensibilidade do fungo *P. pachyrhizi* aos triazóis tem sido observada nos estudos de monitoramento conduzidos no Brasil, com redução significativa de sensibilidade ao grupo (Schmitz et al., 2014; Xavier et al., 2013).

Para vários patógenos, a base genética da resistência aos fungicidas triazóis é associada a uma ou várias mutações pontuais no gene da enzima 14- $\alpha$ -desmetilase dependente do citocromo P450 (CYP51), um gene nuclear que codifica para a proteína alvo do fungicida. Análises do CYP51 de isolados de *P. pachyrhizi* coletados em diferentes regiões do Brasil, em 2010, mostraram associação das mutações F120L, Y131F/H, K142R, I145F e I475T com a menor sensibilidade do fungo aos fungicidas triazóis. Populações amostradas em 2013 e 2014 mostraram predominância na associação das mutações F129L + Y131H e também a presença de mutações triplas pela primeira vez (F129L + Y131F + I145T) (Klosowski et al., 2016a). Além das mutações pontuais, isolados menos sensíveis também apresentaram superexpressão do gene CYP51 (Schmitz et al., 2014). Em estudos sobre adapatabilidade, Klosowski et al. (2016b) mostraram que a frequência de isolados com mutações no CYP51 diminuiu nas misturas de isolados com sensibilidade reduzida a fungicidas IDM com isolado selvagem, mas foi estável quando cultivados isoladamente em folhas de soja destacadas ao longo de quatro ciclos da doença.

Apesar da redução significativa já observada para a maioria dos fungicidas IDM desde 2001/2002, o protriocanazol, último IDM registrado para controle de *P. pachyrhizi* é o que mantém a maior eficiência de controle. Nos experimentos em rede nas últimas safras, tem sido observada variação de eficiência de protriocanazol em alguns locais de avaliação. Esse ingrediente ativo está presente em vários fungicidas em fase de registro, o que pode aumentar a pressão de seleção para resistência nos próximos anos.

## **IQe – estrobilurinas**

A resistência aos fungicidas estrobilurinas (IQe) está associada a mutações no citocromo b. Pelo menos três substituições de aminoácidos nas posições 143, 129 e 137 estão relacionadas com a resistência de fungos fitopatogênicos às estrobilurinas. A mutação na posição 143, resultante da substituição de uma glicina por uma alanina (G143A) é descrita como qualitativa, uma vez que está associada a altos níveis de resistência. As mutações nas posições 129 e 137, resultantes das substituições de uma fenilalanina por uma leucina (F129L) e de uma glicina por uma arginina (G137R), respectivamente, conferem apenas resistência moderada (parcial) (Gisi et al., 2000).

Para *P. pachyrhizi* e outros fungos fitopatogênicos, a análise da sequência do citocromo b revelou a presença de um íntron tipo I logo após o códon 143 (Grasso et al., 2006). A mutação nesse ponto impediria a remoção do íntron, levando a uma deficiência do citocromo b, sendo letal para o fungo. Portanto, a evolução da resistência às estrobilurinas, com base na mutação G143A, tem baixa probabilidade de ocorrer para fungos que possuem o íntron logo após o códon 143. Como a mutação G143A é a mais relevante em outros patossistemas, isso levou erroneamente a supor que a resistência a estrobilurinas não seria problema para *P. pachyrhizi*. Após a queda de eficiência observada para azoxistrobina nos experimentos na safra 2013/2014 (Figura 4), na análise molecular do citocromo b de populações do fungo *P. pachyrhizi* foi encontrada alta frequência da mutação F129L em amostras de campo e isolados monouredinais (Klosowski et al., 2016a). Essa mutação não foi encontrada nas análises das populações de 2010 (Schmitz et al., 2014). A frequência da mutação F129L nas safras seguintes permaneceu alta (em torno de 90%), nas principais regiões produtoras. De acordo com Klosowski et al. (2016a) não ocorre heteroplasma do gene citocromo b de *P. pachyrhizi*, o que significa que nenhum ou todos os genes são mutados, explicando a alta frequência observada nos monitoramentos.

Pesquisas comparando isolados com e sem a mutação, multiplicados por quatro ciclos, mostraram que a frequência da mutação F129L permanece alta, mesmo na ausência do fungicida, mostrando baixo custo adaptativo da mutação para o fungo (Klosowski et al., 2016b). O fato de praticamente todos os fungicidas comerciais conterem estrobilurina na formulação, associada ao baixo custo adaptativo, faz com que a presença dessa mutação no genoma do fungo seja constante.

Embora a resistência cruzada entre ingredientes ativos com o mesmo modo de ação ocorra, as mutações afetaram os ativos de forma diferenciada. Entre as estrobilurinas, na presença de populações com a mutação F129L, a eficiência dos ingredientes ativos picoxistrobina, trifloxistrobina e metominostrobin é maior do que piraclostrobina e azoxistrobina e isso reflete na eficiência das misturas comerciais dos fungicidas (Godoy et al., 2018a, 2019a).

## ISDH – carboxamidas

O mais recente modo de ação sítio-específico a ser utilizado para o controle da ferrugem-asiática foi o das carboxamidas, incluídas nos experimentos em rede pela primeira vez na safra 2011/2012 (benzovindiflupir, fluxapirroxade e bixafen). Esse não é um grupo químico novo. O primeiro ingrediente ativo foi descoberto em 1966 e o que se tem hoje são novos ingredientes ativos dentro desse grupo. Quando começaram a ser utilizadas, já havia sido relatada resistência aos outros dois grupos (triazóis e estrobilurinas), colocando esse grupo em alto risco de seleção de resistência.

Isolados menos sensíveis aos fungicidas a base de carboxamidas foram encontrados pela primeira vez em estudos de monitoramento na safra 2015/2016, envolvendo a mutação I86F na subunidade SdhC (Simões et al., 2018), na região sul do Brasil. Na safra 2016/2017, a menor eficiência dos fungicidas com carboxamidas nos experimentos em rede foi associada aos isolados com a mutação sdhC-I86F. A frequência dessa mutação nos monitoramentos aumentou nas safras seguintes. No monitoramento realizado pela Corteva, a frequência média da mutação I86F em 2015/2016 foi de 10%, em 2016/2017 19%, em 2017/2018 12% (n=270 amostras) e em 2018/2019 22% (n=152) (dados apresentados em reunião técnica, em Cuiabá, MT, em 2019). Nos monitoramentos de campo a frequência da mutação é na maioria das vezes inferior a 50%, mostrando que o fungo mantém somente um dos núcleos mutados (heterocariótico), embora seja possível obter isolado resistente em laboratório (dois núcleos mutados) (Borba, 2019). Em experimentos controlados, o isolado heterocariótico apresentou período mais curto de latência e maior severidade do que o isolado selvagem (Borba, 2019). O custo adaptativo comparativo dos isolados mutados foi medido misturando os isolados resistentes e sensíveis e avaliando a flutuação da frequência de 86F durante cinco ciclos de doença. Apesar do desenvolvimento inicial mais rápido e da maior virulência, o isolado resistente mostrou uma desvantagem competitiva quando foi misturado ao isolado selvagem e uma redução na frequência do alelo 86F foi observada. No entanto, a frequência do alelo 86F foi estável durante cinco ciclos consecutivos da doença quando cultivado sozinho em folhas de soja não tratadas com fungicida (Borba, 2019). Isolados com a mutação sdhC-I86F têm sido encontrados em plantas de soja

voluntárias durante o vazio sanitário, mostrando a capacidade do alelo 86F de se manter na ausência do fungicida durante a entressafra.

Embora ocorra resistência cruzada entre as carboxamidas, na presença de isolados com 50% da mutação I86F, benzovindiflupir e bixafen, que intrinsicamente são mais eficientes na presença de isolados selvagens, apresentaram maiores valores de CE50 (concentração efetiva que inibe 50% do microrganismo) (Simões et al., 2018), quando comparado com fluxapiroxade. A mesma tendência tem sido observada nos experimentos em rede, onde as misturas de fungicidas com fluxapiroxade, embora não sejam as mais eficientes, têm sido mais estáveis do que as misturas com benzovindiflupir no controle da ferrugem após o relato da mutação I86F (Godoy et al., 2018a; 2019a).

Apesar da mutação *sdhC*-I86F ser a mais frequente no campo, já foi observada no monitoramento da empresa Corteva, em 2018/1019, isolados com a mutação N88S em nove amostras de MG, uma de SP e uma do RS. Outros 26 pontos de mutação já foram descritos para carboxamidas em diferentes patossistemas (Avenot; Michailides, 2010).

## **Atual situação do controle químico da ferrugem-asiática**

Os três principais grupos de fungicidas sítio-específicos disponíveis para controle da ferrugem-asiática (IDM, IQe e ISDH) apresentam adaptação do fungo. O intervalo de aplicação foi reduzido no rótulo dos produtos de 21 para 14 dias em razão da menor sensibilidade do fungo *P. pachyrhizi* aos fungicidas hoje disponíveis. A eficiência pode ser reduzida ainda mais, caso ocorra a seleção de isolados com novos pontos de mutação ou outro mecanismo de resistência, principalmente para protioconazol e para as carboxamidas.

Dos novos produtos em fase de registro, protioconazol está presente em diferentes formulações e há duas novas carboxamidas (impirfluxan e fluindapir). Qualquer produto que venha a ser registrado nessa condição, onde já há resistência a todos os ativos, sofre grande pressão de seleção e tende a ter sua eficiência reduzida mais rapidamente.



## Fungicidas multissítios como estratégia antirresistência

Um requisito essencial para uma mistura ser considerada como estratégia antirresistência é que os componentes da mistura não devem apresentar resistência cruzada e cada componente isolado deve apresentar eficiência de controle da doença (FRAC, 2010). Considerando a eficiência isolada dos fungicidas multissítios para ferrugem-asiática (Figura 6), nas doses e intervalos que vêm sendo utilizados no campo (14 dias), por definição, esses fungicidas não podem ser considerados como estratégia antirresistência muito forte para a ferrugem-asiática. Fungicidas multissítios têm sido utilizados em mistura com fungicidas sítio-específicos na cultura da soja para aumentar a eficiência de controle.

O conceito de estratégia antirresistência é muito mais complexo e depende do patossistema e do custo adaptativo que a resistência apresenta ao patógeno. Estudos de modelagem têm sido realizados para avaliar se fungicidas com alto risco de resistência podem ser utilizados em mistura sem selecionar resistência (Mikaberidze et al., 2014). Esses estudos mostram que a adaptabilidade e a competição dos isolados sensíveis e resistentes aos fungicidas são componentes importantes para avaliar a utilidade da mistura. Na ausência de custo adaptativo do isolado resistente, a aplicação de mistura de fungicidas de alto risco (ex. sítio-específico) e fungicidas de baixo risco (ex. multissítio) pode selecionar resistência e eventualmente o fungicida de alto risco deixar de ser funcional (Mikaberidze et al., 2014).

O que se observa é que *P. pachyrhizi* vem mantendo várias mutações que conferem resistência a IDM, IQe e ISDH no seu genoma, mesmo na ausência do fungicida. Os fungicidas multissítios têm sido utilizados para aumentar a eficiência de controle, sendo importantes no manejo da doença, considerando que a resistência já ocorre no patossistema.

A frequente exposição do fungo ao mesmo fungicida e o excesso de aplicações são fatores que contribuem para a seleção de isolados menos sensíveis/resistentes. Estratégias antirresistência têm sido recomendadas e incluem rotacionar e utilizar misturas comerciais de fungicidas com diferentes modos de ação e sem resistência cruzada; utilizar dose e intervalo de aplicação recomendados pelo fabricante, ajustados para a epidemia da doença, evitando extenso intervalo entre as aplicações; aplicar preventivamente,

monitorando a lavoura e acompanhando a situação de inóculo na região, aplicando próximo ao fechamento das entrelinhas da soja quando já houver relato de ferrugem-asiática na região. Quanto aos fungicidas com ISDH, não devem ser utilizados em mais do que duas aplicações do mesmo fungicida em sequência e, no máximo, duas aplicações de ISDH por cultivo. Fungicidas ISDH não são recomendados quando a doença já estiver estabelecida na lavoura. A extensa janela de semeadura, com aumento de inóculo do fungo da ferrugem nas semeaduras tardias e necessidade de aumento do número de aplicações, favorece a pressão de seleção para resistência nessas semeaduras. A adoção de datas limites para a semeadura é uma estratégia para atrasar o aparecimento de novos isolados resistentes e tentar preservar a eficiência dos fungicidas em uso por um período maior.

Outros fitopatógenos também adquiriram resistência a fungicidas. As mesmas aplicações que selecionaram a resistência do fungo *P. pachyrhizi* aos fungicidas IDM, IQe e ISDH também já selecionaram populações dos fungos *Cercospora kikuchii* (crestamento foliar de *Cercospora*) resistentes a IQe e MBC (Soares et al., 2015; Mello, 2019); *Corynespora cassiicola* (mancha-alvo) resistentes a IQe, MBC e SDHI (FRAC, 2019; Mello, 2019); *Colletotrichum truncatum* (antracnose) resistentes a IQe (Mello, 2019). O que os diferencia da ferrugem-asiática é o potencial de dano, que é menor para essas doenças, mas as reclamações de falha de controle também vêm acontecendo em decorrência da resistência dos fungos.

O vazio sanitário e a semeadura de cultivares precoces têm feito com que a maioria das lavouras apresente escape da ferrugem-asiática. Com essas duas estratégias, a ferrugem passou a ser uma doença de final de ciclo com tendência a ocorrer em semeaduras a partir do final de novembro, predominando em regiões com semeaduras tardias. Cultivares com genes de resistência quando disponíveis e fungicidas com eficiência acima de 50% de controle associados a fungicidas multissítios têm sido utilizados para o controle da doença em regiões que apresentam maior pressão da doença. A adoção do vazio sanitário e a mudança das cultivares ao longo dos anos foi o que mais contribuiu no controle da doença, mas o fungo evoluiu desde sua introdução no Brasil e continuará evoluindo.

As estratégias de manejo da ferrugem-asiática foram propostas levando-se em conta todo o conhecimento disponível e, considerando que a pesquisa não

é estática, à medida que novas informações forem surgindo, outras medidas poderão ser recomendadas. Mas sempre será fundamental integrar todas as estratégias para obter o controle adequado e manter a produtividade da cultura.

## Referências

- AGROFIT: consulta aberta. Brasília, DF: MAPA, c2003. Disponível em: <[http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit\\_cons/principal\\_agrofit\\_cons](http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons)>. Acesso em: 28 fev. 2020.
- ALVES, S. A. M.; FURTADO, G. Q.; BERGAMIN FILHO, A. Influência das condições climáticas sobre a ferrugem da soja. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). **Ferrugem asiática da soja**. Viçosa: Suprema Gráfica e Editora, 2006. p. 37-59.
- AVENOT, H. F.; MICHAILIDES, T. Progress in understanding molecular mechanisms and evolution of resistance to succinate dehydrogenase inhibiting (SDHI) fungicides in phytopathogenic fungi. **Crop Protection**, v. 29, p. 643-651, 2010.
- BEDENDO, I. P. Ferrugens. In: AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A. (Ed.). **Manual de fitopatologia: princípios e conceitos**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 2018. v. 1. p. 355-360.
- BORBA, J. P. **Does the I86F mutation of succinate dehydrogenase subunit c increase fungicide resistance and have a fitness in Asian Soybean Rust (*Phakopsora pachyrhizi*)?** 2019. 73 f. Dissertação (Mestrado em Fitopatologia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba.
- BRENT, K. J. Historical perspectives of fungicide resistance. In: THIND, T. S. (Ed.). **Fungicide resistance in crop protection: risk and management**. Wallingford: CAB, 2012. p. 3-18.
- BROMFIELD, K. R.; HARTWIG, E. E. Resistance to soybean rust and mode of inheritance. **Crop Science**, v. 20, p. 254-255, 1980.
- CHILDS, S. P.; BUCK, J. W.; LI, Z. Breeding soybeans with resistance to soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*). **Plant Breeding**, v. 137, n. 3, p. 250-261, 2018. DOI: 10.1111/pbr.12595.
- CONSÓRCIO ANTIFERRUGEM. **Ferrugem em números**. 2019. Disponível em: <<http://www.consorcioantiferrugem.net/#/numeros>>. Acesso em: 28 fev. 2020.
- CONSÓRCIO ANTIFERRUGEM. **Moção CAF futuro do controle de doenças no Brasil 2013/14**. 2014. Disponível em: <<http://www.consorcioantiferrugem.net/#/conteudos/view/1>>. Acesso em: 28 fev. 2020.
- CONSÓRCIO ANTIFERRUGEM. **Ocorrências**. 2020a. Disponível em: <[www.consorcioantiferrugem.net](http://www.consorcioantiferrugem.net)>. Acesso em: 26 fev. 2020.
- CONSÓRCIO ANTIFERRUGEM. **Produtos para controle**. 2020b. Disponível em: <<http://www.consorcioantiferrugem.net/#/conteudos/view/11>>. Acesso em: 26 fev. 2020.

DEACON, J. W. **Modern mycology**. 3rd. ed. London: Blackwell Science, 1997. 303 p.

DEL PONTE, E. M.; GODOY, C. V.; LI, X.; YANG, X. B. Predicting severity of Asian soybean rust epidemics with empirical rainfall models. **Phytopathology**, v. 96, p. 797-803, 2006.

DIAS, W. P.; SILVA, J. F. V.; KIIHL, R. A. S.; HIROMOTO, D. M.; ABDELNOOR, R. V. Quebra da resistência da cv. Hartwig por população de campo do nematoide de cisto da soja (*Heterodera glycines*). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 6, p. 971-974, 1998.

FRAC. Fungicide Resistance Action Committee. **FRAC recommendations for fungicide mixtures designed to delay resistance evolution**. 2010. Disponível em: <<https://www.frac.info/docs/default-source/publications/frac-recommendations-for-fungicide-mixtures/frac-recommendations-for-fungicide-mixtures---january-2010.pdf>>. Acesso em: 29 fev. 2020.

FRAC. Fungicide Resistance Action Committee. **Minutes of the 2019 QoI Working Group**. 2019. Disponível em: <<https://www.frac.info/home/news/2019/09/09/minutes-and-recommendations-of-the-qoi-working-group-are-now-available>>. Acesso em: 9 jul. 2019.

GISI, U.; CHIN, K. M.; KNAPOVA, G.; KÜNG FÄRBER, R.; MOHR, U.; PARISI, S.; SIEROTZKI, H.; STEINFELD, U. Recent developments in elucidating models of resistance to phenylamide, DMI and strobilurin fungicides. **Crop Protection**, v. 19, p. 863-872, 2000.

GODOY, C. V.; ALMEIDA, A. M. R.; COSTAMILAN, L. M.; MEYER, M. C.; DIAS, W. P.; SEIXAS, C. D. S.; SOARES, R. M.; HENNING, A. A.; YORINORI, J. T.; FERREIRA, L. P.; SILVA, J. F. V. Doenças da soja. In: AMORIM, L.; REZENDE, J. A. M.; BERGAMIN FILHO, A.; CAMARGO, L. E. A. (Ed.). **Manual de fitopatologia: doenças das plantas cultivadas**. 5. ed. Ouro Fino: Agronômica Ceres, 2016. v. 2. p. 657-675.

GODOY, C. V.; UTIAMADA, C. M.; MEYER, M. C.; CAMPOS, H. D.; LOPES, I. de O. N.; DIAS, A. R.; PIMENTA, C. B.; ANDRADE JUNIOR, E. R. de; MORESCO, E.; SIQUERI, F. V.; JULIATI, F. C.; JULIATI, F. C.; FAVERO, F.; ARAÚJO JUNIOR, I. P.; CHAVES, I. C. P. V.; ROY, J. M. T.; GRIGOLLI, J. F. J.; NUNES JUNIOR, J.; NAVARINI, L.; BELUFI, L. M. de R.; SILVA, L. H. C. P.; SATO, L. N.; SENER, M.; GOUSSAIN JUNIOR, M. M.; DEBORTOLI, M. P.; MARTINS, M. C.; TORMEN, N. R.; BALARDIN, R. S.; MADALOSSO, T.; VENANCIO, W. S. **Eficiência de fungicidas para o controle da ferrugem-asiática da soja, *Phakopsora pachyrhizi*, na safra 2018/19: resultados sumarizados dos ensaios cooperativos**. Londrina: Embrapa Soja, 2019a. 10 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 148).

GODOY, C. V.; UTIAMADA, C. M.; MEYER, M. C.; CAMPOS, H. D.; LOPES, I. de O. N.; DIAS, A. R.; DEUNER, C. C.; PIMENTA, C. B.; BORGES, E. P.; SIQUERI, F. V.; JULIATTI, F. C.; JULIATTI, F. C.; FAVERO, F.; ARAÚJO JÚNIOR, I. P.; GRIGOLLI, J. F. J.; NUNES JUNIOR, J.; CARREGAL, L. H.; SATO, L. N.; DEBORTOLI, M. P.; MARTINS, M. C.; BALARDIN, R. S.; MADALOSSO, T.; CARLIN, V. J.; VENÂNCIO, W. S. **Eficiência de fungicidas multissítios no controle da ferrugem-asiática da soja, *Phakopsora pachyrhizi*, na safra 2017/18: resultados sumarizados dos ensaios cooperativos**. Londrina: Embrapa Soja, 2018b. 17 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 144).

GODOY, C. V.; UTIAMADA, C. M.; MEYER, M. C.; CAMPOS, H. D.; LOPES, I. de O. N.; DIAS, A. R.; PIMENTA, C. B.; SIQUERI, F. V.; JULIATTI, F. C.; JULIATTI, F. C.; FAVERO, F.; ARAÚJO JÚNIOR, I. P.; ROY, J. M. T.; GRIGOLLI, J. F. J.; NUNES JUNIOR, J.; NAVARINI, L.; SILVA, L. H. C. P. da; SATO, L. N.; CANTERI, M. G.; DEBORTOLI, M. P.; MARTINS, M. C.; TORMEN, N. R.; BALARDIN, R. S.; MADALOSSO, T.; CARLIN, V. J.; VENANCIO, W. S. **Eficiência de fungicidas multissítios no controle da ferrugem-asiática da soja, *Phakopsora pachyrhizi*, na safra 2018/19: resultados sumarizados dos experimentos cooperativos**. Londrina: Embrapa Soja, 2019b. 8 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 151).

GODOY, C. V.; UTIAMADA, C. M.; MEYER, M. C.; CAMPOS, H. D.; LOPES, I. de O. N.; DIAS, A. R.; DEUNER, C. C.; PIMENTA, C. B.; JACCOUD FILHO, D. S.; MOREIRA, E. N.; BORGES, E. P.; ANDRADE JUNIOR, E. R. de; SIQUERI, F. V.; JULIATTI, F. C.; JULIATTI, F. C.; FAVERO, F.; FEKSA, H. R.; ARAÚJO JUNIOR, I. P.; GRIGOLLI, J. F. J.; NUNES JUNIOR, J.; BELUFI, L. M. de R.; CARNEIRO, L. C.; CARREGAL, L. H.; SATO, L. N.; CANTERI, M. G.; VOLF, M. R.; GOUSSAIN, M.; DIAS, M. D.; DEBORTOLI, M. P.; MARTINS, M. C.; BALARDIN, R. S.; FURLAN, S. H.; MADALOSSO, T.; CARLIN, V. J.; VENANCIO, W. S. **Eficiência de fungicidas para o controle da ferrugem-asiática da soja, *Phakopsora pachyrhizi*, na safra 2017/2018: resultados sumarizados dos ensaios cooperativos**. Londrina: Embrapa Soja, 2018a. 8 p. (Embrapa Soja. Circular técnica, 138).

GODOY, C. V.; UTIAMADA, C. M.; MEYER, M. C.; CAMPOS, H. D.; PIMENTA, C. B.; CASSETARI NETO, D.; JACCOUD FILHO, D. S.; BORGES, E. P.; ANDRADE JUNIOR, E. R. de; SIQUERI, F. V.; JULIATTI, F. C.; FEKSA, H. R.; GRIGOLLI, J. F. J.; NUNES JUNIOR, J.; CARNEIRO, L. C.; SILVA, L. H. C. P. da; SATO, L. N.; CANTERI, M. G.; MADALOSSO, M.; ITO, M. F.; MARTINS, M. C.; BALARDIN, R. S.; FURLAN, S. H.; MONTECELLI, T. D. N.; CARLIN, V. J.; BARROS, V. L. N. P. de; VENANCIO, W. S. **Eficiência de fungicidas para o controle da ferrugem-asiática da soja, *Phakopsora pachyrhizi*, na safra 2013/14: resultados sumarizados dos ensaios cooperativos**. Londrina: Embrapa Soja, 2014. 7 p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 103).

GRASSO, V.; PALERMO, S.; SIEROTZKI, H.; GARIBALDI, A.; GISI, U. Cytochrome b gene structure and consequences for resistance to Qo inhibitor fungicides in plant pathogens. **Pest Management Science**, v. 62, p. 465-472, 2006.

HARTMAN, G. L.; SIKORA, E. J.; RUPE, J. C. Rust. In: HARTMAN, G. L.; RUPE, J. C.; SIKORA, E. J.; DOMIER, L. L.; DAVIS, J. A.; STEFFEY, K. L. (Ed.) **Compendium of soybean diseases**. 5th. ed. Saint Paul: APS Press, 2015. p. 56-59.

HORSFALL, J. G. **Fungicides and their action**. Waltham, MA: Chronica Botanica, 1945. 244 p.

ISARD, S. A.; DUFAULT, N. S.; MILES, M. R.; HARTMAN, G. L.; RUSSO, J. M.; WOLF, E. D.; MOREL, W. The effect of solar irradiance on the mortality of *Phakopsora pachyrhizi* urediniospores. **Plant Disease**, v. 90, p. 941-945, 2006.

JACCOUD FILHO, D. S.; HIAR, C. P.; BONA, P. F.; GASPERINI, L. Ocorrência da ferrugem da soja na Região dos Campos Gerais do Paraná. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL, 23., 2001, Londrina. **Resumos...** Londrina: Embrapa Soja, 2001. p. 109-110. (Embrapa Soja. Documentos, 157).

KLOSOWSKI, A. C.; BRAHM, L.; STAMMLER, G.; MAY DE MIO, L. L. Competitive fitness of *Phakopsora pachyrhizi* isolates with mutations in the CYP51 and CYTB genes. **Phytopathology**, v. 106, p. 1278-1284, 2016b.

KLOSOWSKI, A. C.; MAY DE MIO, L. L.; MIESSNER, S.; RODRIGUES, R.; STAMMLER, G. Detection of the F129L mutation in the cytochrome b gene in *Phakopsora pachyrhizi*. **Pest Management Science**, v. 72, p. 1211-1215, 2016a.

KOCHMAN, J. K. Effect of temperature on development of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*). **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 30, p. 273-277, 1979.

LI, X.; ESKER, P. D.; PAN, Z.; DIAS, A. P.; XUE, L.; YANG, X. B. The uniqueness of soybean rust pathosystem: an improved understanding of the risk in different regions of the world. **Plant Disease**, v. 94, p. 796-806, 2010.

- LUCAS, J. A.; HAWKINS, N. J.; FRAAIJE, B. A. The evolution of fungicide resistance. **Advances in Applied Microbiology**, v. 90, p. 29-92, 2015.
- MATIELLO, R. R.; BARBIERI, R. L.; CARVALHO, F. I. F. de. Resistência das plantas a moléstias fúngicas. **Ciência Rural**, v. 27, n. 1, p. 161-168, 1997.
- MCDOWELL, L. L.; WILLIS, G. H.; SOUTHWICK, L. M.; SMITH JR, S. Fenvalerate wash-off from cotton plants by rainfall. **Pest Science**, v. 21, p. 83-92, 1987.
- MCGRATH, M. T. What are fungicides? **The Plant Health Instructor**, 2004. DOI: 10.1094/PHI-I-2004-0825-01.
- MELCHING, J. S.; DOWLER, W. M.; KOOGLE, D. L.; ROYER, M. H. Effects of duration, frequency, and temperature of leaf wetness periods on soybean rust. **Plant Disease**, v. 73, p. 117-122, 1989.
- MELLO, F. E. **Variabilidade genética e sensibilidade de *Cercospora kikuchii*, *Colletotrichum truncatum* e *Corynespora cassiicola* a fungicidas**. 2019. 232 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.
- MIKABERIDZE, A.; MCDONALD, B. A.; BONHOEFFER, S. Can high-risk fungicides be used in mixtures without selecting for fungicide resistance? **Phytopathology**, v. 104, p. 324-331, 2014. DOI: 10.1094/PHYTO-07-13-0204-R.
- NEELY, D. Persistence of foliar protective fungicides. **Phytopathology**, v. 60, p. 1583-1586, 1970.
- NIBLACK, T. L.; COLGROVE, A. L.; COLGROVE, K.; BOND, J. P. Shift in virulence of soybean cyst nematode is associated with use of resistance from PI 88788. **Plant Health Progress**, 18 jan. 2008. DOI: 10.1094/PHP-2008-0118-01-RS.
- ONO, Y.; BURITICÁ, P.; HENNEN, J. F. Delimitation of *Phakopsora*, *Physopella* and *Cerotelium* and their species on Leguminosae. **Mycological Research**, v. 96, n. 10, p. 825-850, 1992.
- PATIL, P. V.; WUIKE, R. V.; THAKARE, C. S.; CHIRAME, B. B. Viability of uredospores of *Phakopsora pachyrhizi* Syd. at different storage conditions. **Journal of Maharashtra Agricultural Universities**, v. 22, n. 2, p. 261-262, 1997.
- PIVONIA, S.; YANG, X. B. Assessment of the potential year-round establishment of soybean rust throughout the world. **Plant Disease**, v. 88, p. 523-529, 2004.
- REIS, E. M.; REIS, A. C.; ZANATTA, M.; SILVA, L. H. C. P.; SIQUERI, F. V.; SILVA, J. R. **Evolução da redução de sensibilidade de *Phakopsora pachyrhizi* a fungicidas e estratégias para recuperar a eficiência de controle**. Passo Fundo: Berthier, 2017. 104 p.
- ROELFS, A. P. Rusts. In: MALOY, O. C.; MURRAY, T. D. (Ed.). **Encyclopedia of plant pathology**. New York: John Wiley & Sons, 2001. v. 2. p. 874-879.
- RUSSELL, P. E. A century of fungicide evolution. **Journal of Agricultural Science**, v. 143, p. 11-25, 2005. DOI: 10.1017/s0021859605004971.
- SCHEPERS, H. T. A. M. Effect of rain on efficacy of fungicide deposits on potato against *Phytophthora infestans*. **Potato Research**, v. 39, n. 4, p. 541-550, 1996.

- SCHMITZ, H. K.; MEDEIROS, A. C.; CRAIG, I. R.; STAMMLER, G. Sensitivity of *Phakopsora pachyrhizi* towards quinone-outside-inhibitors and demethylation-inhibitors, and corresponding resistance mechanisms. **Pest Management Science**, v. 7, p. 378-388, 2014.
- SEIXAS, C. D. S.; GODOY, C. V. Vazio Sanitário: panorama nacional e medidas de monitoramento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE FERRUGEM ASIÁTICA DA SOJA, 2007, Londrina. **Anais...** Londrina: Embrapa Soja, 2007, p. 23-33. (Embrapa Soja. Documentos, 281).
- SIMÕES, K.; HAWLIK, A.; REHFUS, A.; GAVA, F.; STAMMLER, G. First detection of a SDH variant with reduced SDHI sensitivity in *Phakopsora pachyrhizi*. **Journal of Plant Diseases and Protection**, v. 125, n. 1, p. 21-26, 2018. DOI: 10.1007/s41348- 017-0117-5.
- SIQUERI, F. V. Ocorrência da ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) no Estado de Mato Grosso - safra 2004/05. In: JULIATTI, F. C.; POLIZEL, A. C.; HAMAWAKI, O. T. (Org.). WORKSHOP BRASILEIRO SOBRE A FERRUGEM ASIÁTICA, 1., Uberlândia, 2005. **Coletânea...** Uberlândia: EDUFU, 2005. p. 93-100.
- SLAMINKO, T. L.; MILES, M. R.; FREDERICK, R. D.; BONDE, M. R.; HARTMAN, G. L. New legume hosts of *Phakopsora pachyrhizi* based on greenhouse evaluations. **Plant Disease**, v. 92, n. 5, p. 767-771, 2008.
- SOARES, A. P.; GUILLIN, E. A.; BORGES, L. L.; SILVA, A. C. da; ALMEIDA, A. M. R.; GRIJALBA, P. E.; GOTTLIEB, A. M.; BLUHM, B. H.; OLIVEIRA, L. O. de. More *Cercospora* species infect soybeans across the Americas than meets the eye. **PLoS ONE**, v. 10, n. 8, 2015. DOI: 10.1371/journal.pone.0133495.
- THACKER, J. R. M.; YOUNG, R. D. F. The effects of six adjuvants on the rain fastness of chlorpyrifos formulated as an emulsifiable concentrate. **Pest. Science**, v. 55, p. 198-200, 1999.
- THIND, T. S. (Ed.). **Fungicide resistance in crop protection: risk and management**. Wallingford: CABI, 2012. 296p.
- XAVIER, S. A.; CANTERI, M. G.; BARROS, D. C. M.; GODOY, C. V. Sensitivity of *Corynespora cassiicola* from soybean to carbendazim and prothioconazole. **Tropical Plant Pathology**, v. 38, p. 431-435, 2013.
- YORINORI, J. T.; MOREL, W.; FERNANDEZ, F. T. P. Epidemia de ferrugem de soja no Paraguai e na Costa Oeste do Paraná, em 2001. In: REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO CENTRAL DO BRASIL, 23., 2001, Londrina. **Resumos...** Londrina: Embrapa Soja, 2001. p.117-118. (Embrapa Soja. Documentos, 157).
- YORINORI, J. T.; PAIVA, W. M.; FREDERICK, R. D.; COSTAMILAN, L. M.; BERTAGNOLLI, P. F.; GODOY, C. V.; NUNES JUNIOR, J. Epidemics of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) in Brazil and Paraguay from 2001 to 2003. **Plant Disease**, v. 89, p. 675-677, 2005.

